

# 와류 발생기의 공동 유동 특성에 관한 연구

홍지우\* · 김영진 · 안병권†

## Study on characteristics of cavitating flow around vortex generators

Ji-Woo Hong\*, Young-Jin Kim and Byoung-Kwon Ahn†

**Abstract** In this study, we present experimental results of cavitating flow around a vortex generator which is used to improve the flow in the wake of ships and enhance propulsion efficiency. We conducted experiments at the CNU cavitation tunnel on a total of six vortex generators, two different aspect ratios and three taper ratios. We recorded cavity patterns using a high-speed camera and quantitatively evaluated cavity fraction using OpenCV. The most important finding of this study is that the vortex cavity generated at a root leading edge of the vortex generator develops at a specific angle.

**Key Words** : Vortex generator(와류 발생기), Cavitation(공동, 캐비테이션), Taper wing(테이퍼 날개), High-speed image(초고속 영상), Flow visualization(유동 가시화)

### 1. 서론

최근 해상 운송수단의 대형화, 고속화에 따른 운항효율 증대에 대한 요구가 커지고 있으며, 동시에 해양 환경보호를 위한 각종 규제가 강화되고 있다. 선박의 형상 최적화를 통한 운항효율 증가는 설계 기술의 발전으로 정점에 도달했다고 볼 수 있으며 이에 따라 선형의 최적화 이외의 기술에 관한 연구들이 활발히 진행되어 왔다. Yoon & Chun(2004)은 외부 자기장을 부가한 실린더 주위의 유동 제어 및 저항감소 효과에 관한 연구를 수행하였고, Latorre(1997)는 선

체 바닥면에 공기를 분사하여 마찰저항을 감소시킬 수 있음을 보였다. 또한, 운동체 표면에 부가물을 부착하여 주변의 유동을 제어함으로써 효율을 높이는 연구들이 수행되고 있다. 특히 와류 발생기(vortex generator)는 잘 알려진 수동적인 유동 제어 방법의 하나로, 와류를 발생시켜 경계층 내부의 운동량을 증가시켜 좁은 유동 박리를 지연시킬 수 있어 다양한 공학적 문제에 응용되고 있다. Lee et al.(2015)은 화물 차량에 여러 종류의 부가물을 부착하는 모형시험을 수행하여 공기저항을 감소시키는 연구를 수행하였고, Fernandez Gamiz et al.(2017)은 수치해석 기법을 사용하여 풍력 터빈 날개에 와류 발생기와 거니 플랩(Gurney flap)을 부착했을 때 터빈 출력이 향상되는 효과가 있음을 보였다. Lee & Lee(2018)는 선형수조 모형시험 및 PIV 유동 가시화를 통해 선박의 후류 영역에 수직날

† Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University  
E-mail: bkahn@cnu.ac.kr

\* Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University

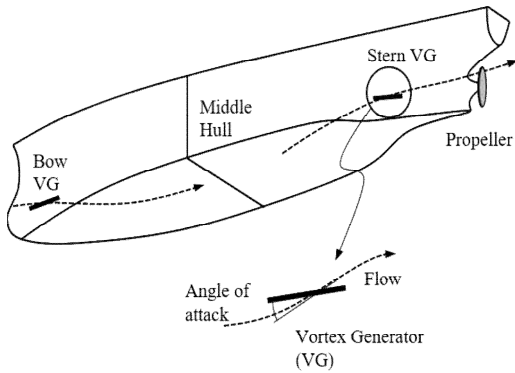


Fig. 1. Ship flow and a vortex generator

구조의 와류 발생기를 부착하여 유동 개선효과를 피할 수 있으며 결과적으로 효율이 향상된다는 것을 규명하였다. 최근에 건조되는 선박들은 대형화, 고속화되고 있으며 형상변화가 큰 선미부에서 박리되는 유동을 개선할 목적으로 와류 발생기를 부착하는 사례가 늘어나고 있다(Fig. 1 참조). Li et al.(2021)은 선체 표면에 와류 발생기를 부착했을 때 프로펠러로 유입되는 유동이 개선되지만, 고속으로 이동하는 경우 와류 발생기에서 공동(Cavitation)이 발생하여 추력이 감소할 위험성이 있다는 것을 보였다. 수중 운동체에서 발생하는 공동현상은 운동체의 효율을 감소시킬 뿐만 아니라 수중소음의 가장 주된 요인으로 작용하기 때문에 이를 줄이는 것은 매우 중요한 일이다. 특히 선미에 설치된 와류 발생기에서 생성되는 공동이 프로펠러로 유입되어 추진효율을 저하시키고 유기되는 소음을 증가시키는 사례가 늘어나면서 이에 대한 연구의 필요성이 높아지고 있다. Jeong & Ahn(2016)은 와류 발생기와 유사한 형상을 갖는 초공동 수중운동체용 췌기형 제어핀에 작용하는 유체력 특성에 대해 연구한 바 있다. 그러나 와류 발생기에서 생성되는 공동 유동의 현상학적 특성에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 캐비테이션 터널에서의 모형실험을 통해 다양한 테이퍼 비를 갖는 와류 발생기에서 발생하는 공동 특성을 평가하고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험조건

실험은 충남대학교 캐비테이션 터널에서 수행하였다. 터널의 관측부 크기는 가로, 세로가 각각 100 mm, 길이는 1400 mm로 최대 유속은 20 m/s이다. 터널 내부의 압력은 0.1 Bar에서 3 Bar까지 조절하여 캐비테이션수를 조절할 수 있다(Fig. 2 참조). 실험 모형은 Fig. 3과 같이 정의한 단면의 각도(Section angle,  $\theta$ )가 12도, 테이퍼 각도(Taper angle,  $\beta$ )가 45도, 60도, 70도, 종횡비(Aspect ratio, AR)가 0.8, 1.1인 총 6종의 와류 발

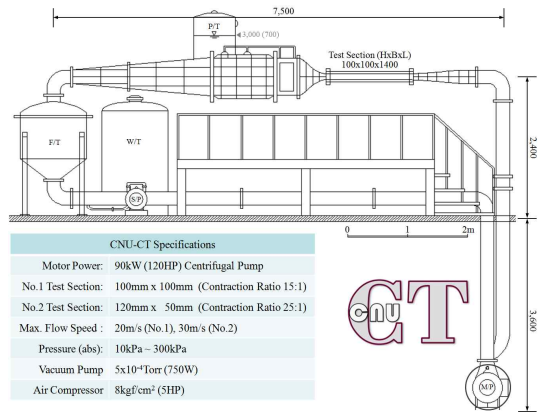


Fig. 2. Cavitation tunnel (CNU-CT)

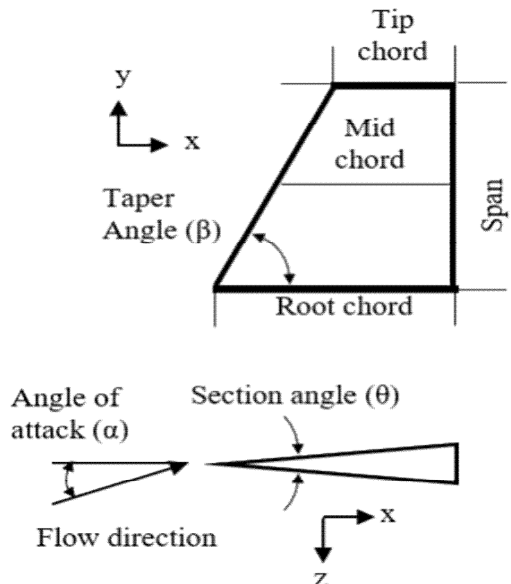


Fig. 3. Geometry of the test model

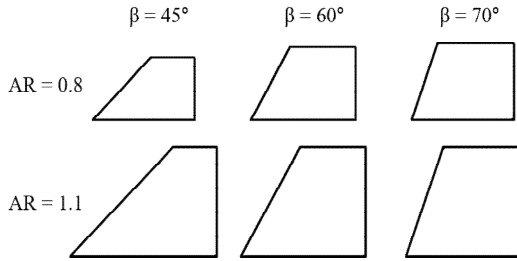


Fig. 4. Test models

생기를 대상으로 하였다. 여기서 종횡비는 식 (1)과 같이 정의하였으며, 모형별 형상과 크기는 Fig. 4와 Table 1에 나타내었다.

$$AR = \frac{S}{C_{mid}} \quad (1)$$

Table 1. Test model specification

Taper angle [°]	Tip chord [mm]	Root chord [mm]	Span [mm]	AR
45	19.2	64.2	45	1.1
		44.7	25.5	0.8
60	28.7	54.6	45	1.1
		45.9	29.8	0.8
70	33.5	49.8	45	1.1
		44.9	31.3	0.8

여기서 S는 스패 길이,  $C_{mid}$ 는 1/2 스패 위치에서의 코드 길이이다. 캐비테이션의 발달 과정은 터널 관측부 측면에 설치된 초고속카메라(Table 2 참조)를 사용하여 5,000 fps로 기록하였으며 (Fig. 5, 6 참조), 영상 분석을 통해 공동 유동의 생성과 발달 특성을 평가하였다. 특히, 특정 조건에서 발생하는 공동은 OpenCV를 이용한 이미지 분석을 사용하여 정량적으로 평가하였다.

Table 2. High-speed camera specification

Frame rate (max)	800,000 fps
Pixel size	10 $\mu$ m (square)
H $\times$ V resolution	1280 px $\times$ 1024 px
Bit depth (ADC)	12 bits

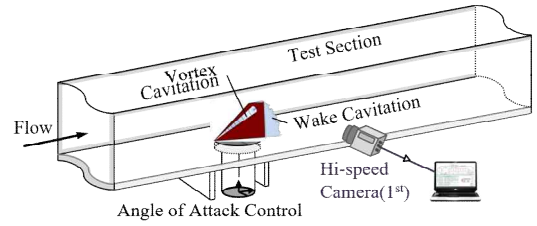


Fig. 5. Schematic view

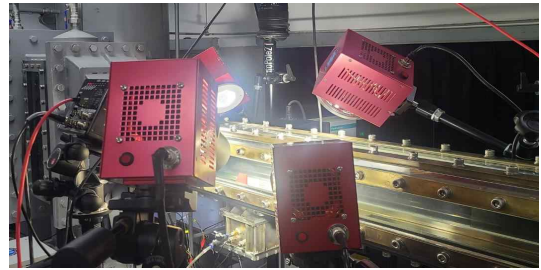


Fig. 6. Experimental set-up

실험은 지정된 받음각(Angle of attack, AoA,  $\alpha$ ) 조건에서 유속이 증가할 때, 즉 식 (2)로 정의된 캐비테이션 수( $\sigma$ )가 감소할 때 발생하는 공동 유동을 관측하였다.

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2)$$

여기서  $P_{\infty}$ 는 관측부의 시작위치에서 측정한 유입 유동의 압력이며  $P_v$ 는 물의 증기압 (2.6 kPa),  $\rho$ 는 물의 밀도 (998 kg/m<sup>3</sup>), V는 유입 유속이다.

### 3. 실험 결과

Fig. 7은 테이퍼 각도 45도, 종횡비 1.1인 보텍스 발생기의 받음각이 0도와 10도인 조건에서 생성되는 대표적인 캐비테이션의 발생 특성을 보여준다. 받음각이 0도인 경우, 캐비테이션 수가 낮아지면서 후류 보텍스 캐비테이션(Wake Vortex Cavitation, WVC)이 발생하여 성장하는 것을 볼 수 있다. 받음각이 10도인 경우, 먼저 뿌리(root)의 앞날에서 보텍스 캐비테이션(Root Leading edge Vortex Cavitation, RLVC)이 특정

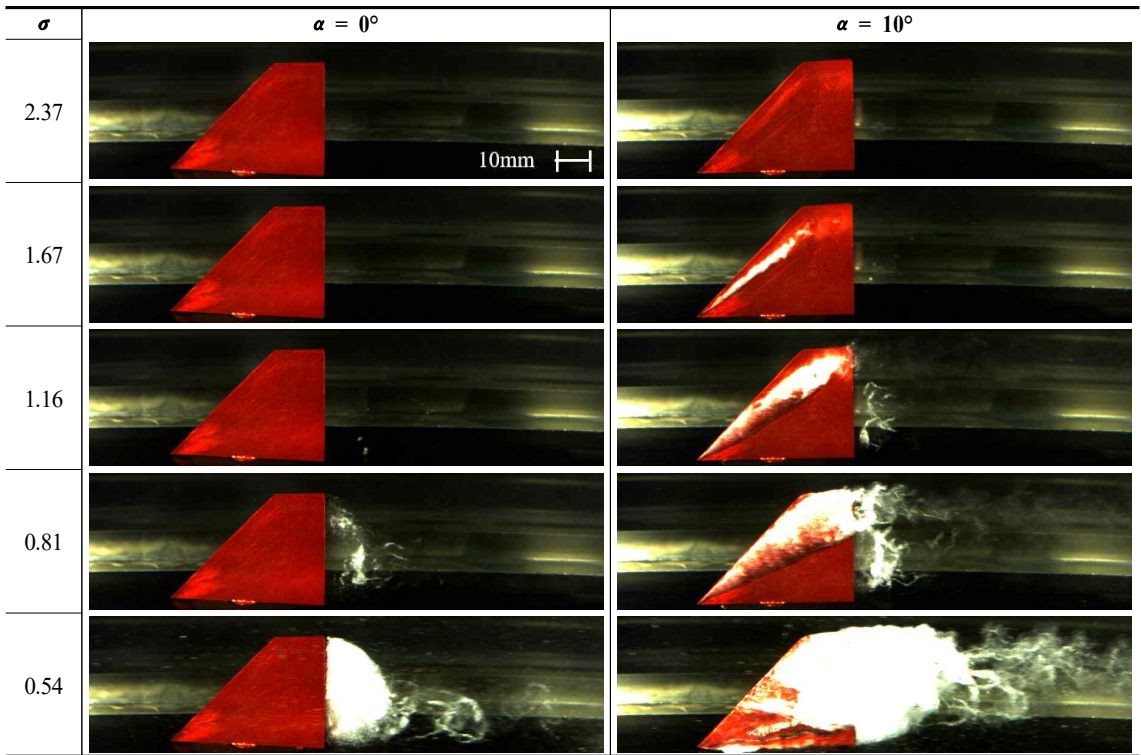


Fig. 7. Cavitation patterns ( $\beta = 45^\circ$ , AR = 1.1)

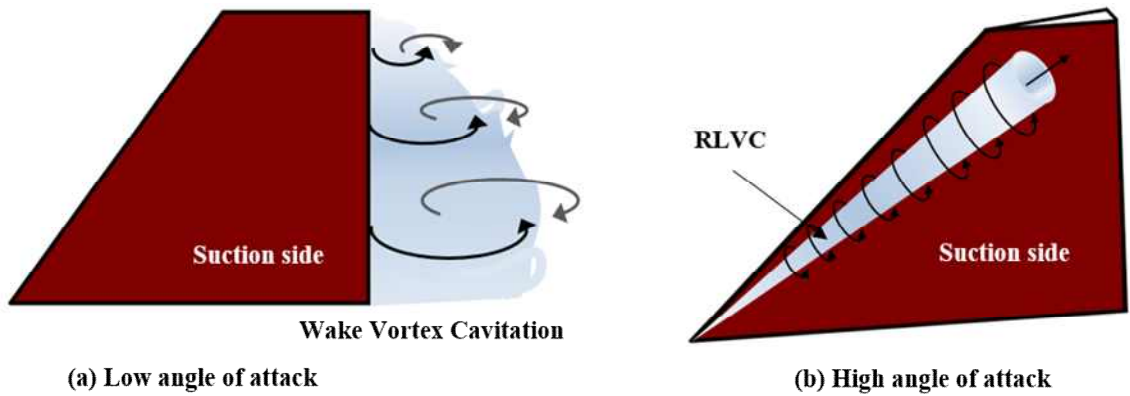


Fig. 8. Schematic view of cavitation at taper hydrofoil

각도로 발생하여 성장하고, 이후 후류 보텍스 캐비테이션이 발생한다. RLVC의 발생 특성은 Fig. 8을 통해 이해할 수 있으며 RLVC의 각도를 계측하여 테이퍼 각과의 관계를 평가하였다. 받음각이 작은 경우에는 수중익의 압력면 (pressure side)에서 흡입면(suction side)으로 넘어 오는 3차원 유동의 영향이 없기 때문에 스펠방

향 각 위치에서의 유동은 썩기형 단면을 가진 2차원 물수체에서 발생하는 것과 동일하게 특정 주기로 박리되는 후류 보텍스 캐비테이션 (WVC)이 발생한다. 이때, 스펠방향 위치에 따른 보텍스 유동의 크기는 단면의 코드길이의 영향을 받기 때문에 뿌리쪽(root)에 가까울수록 캐비테이션이 커지는 특성을 보인다. 이와 반대로

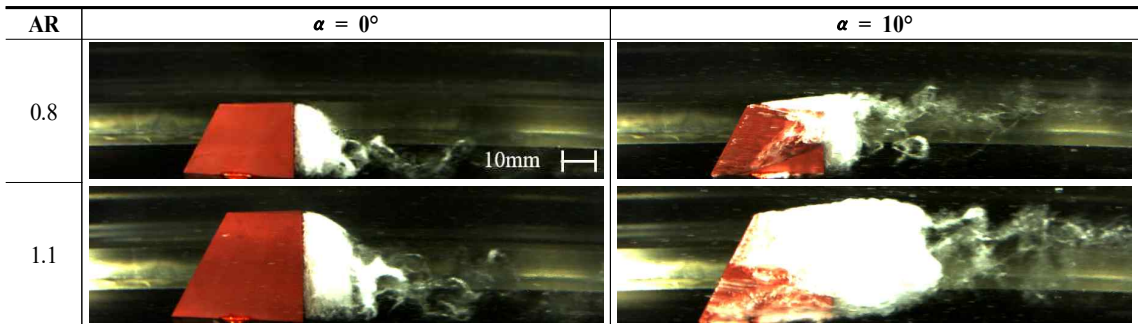


Fig. 9. Cavitation pattern comparison ( $\beta = 60^\circ$ ,  $\sigma = 0.54$ )

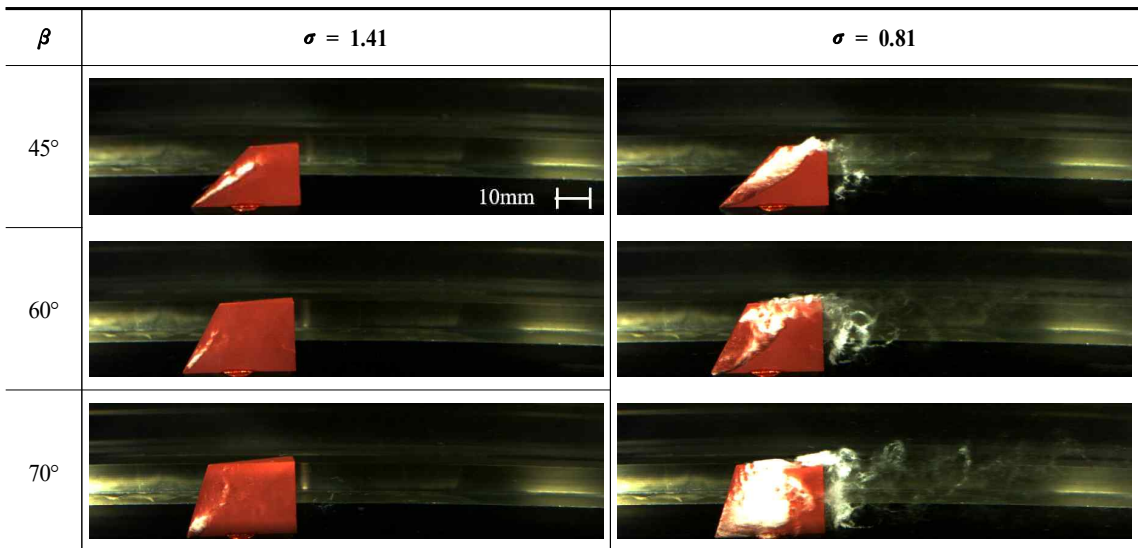


Fig. 10. Cavitation pattern comparison (AR = 0.8, AoA = 10°)

받음각이 높은 경우, 3차원적인 유동이 상대적으로 강해지기 때문에 수중익의 앞날에서 유동 방향으로 나선 형태의 보텍스 구조가 형성되어 위쪽으로 갈수록 캐비테이션이 커지는 형태를 취하게 되는 것을 알 수 있다. 유속이 매우 빠른  $\sigma = 0.54$  조건에서는 캐비테이션이 보텍스 발생기 전체를 다 감싸는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 테이퍼 각도 60도인 서로 다른 종횡비를 갖는 보텍스 발생기에서 생성되는 캐비테이션을 비교한 것이다. 전체적인 캐비테이션의 발생 패턴은 종횡비에 상관없이 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있으나, 받음각이 10도일 때 종횡비가 클수록 발생하는 캐비테이션의 크기(캐비테이션이 덮는 면적)가 증가하는 것을 확인할

수 있다. 이는 압력면에서 흡입면으로 넘어오는 유동의 영향으로 종횡비가 커질수록 3차원 효과는 더 커지기 때문이다. Fig. 10은 종횡비가 0.8인 보텍스 발생기의 받음각이 10도 조건에서 발생하는 캐비테이션을 테이퍼 각도에 따라 비교한 것이다. 테이퍼 각도가 작아질수록 RLVC가 더욱 강하게 발생하며, 테이퍼 각도가 크면 LSC (Leading edge Sheet Cavitation)가 발생하며 WVC의 양이 커지는 것을 볼 수 있다.

보텍스 발생기에서 생성되는 캐비테이션을 정량적으로 평가하기 위해 OpenCV를 이용한 이미지 분석법을 사용하였다. 해석하고자 하는 사진은 캐비테이션이 없는 배경 이미지와의 픽셀 차이를 이용한 차영상 기법을 사용하여 캐비

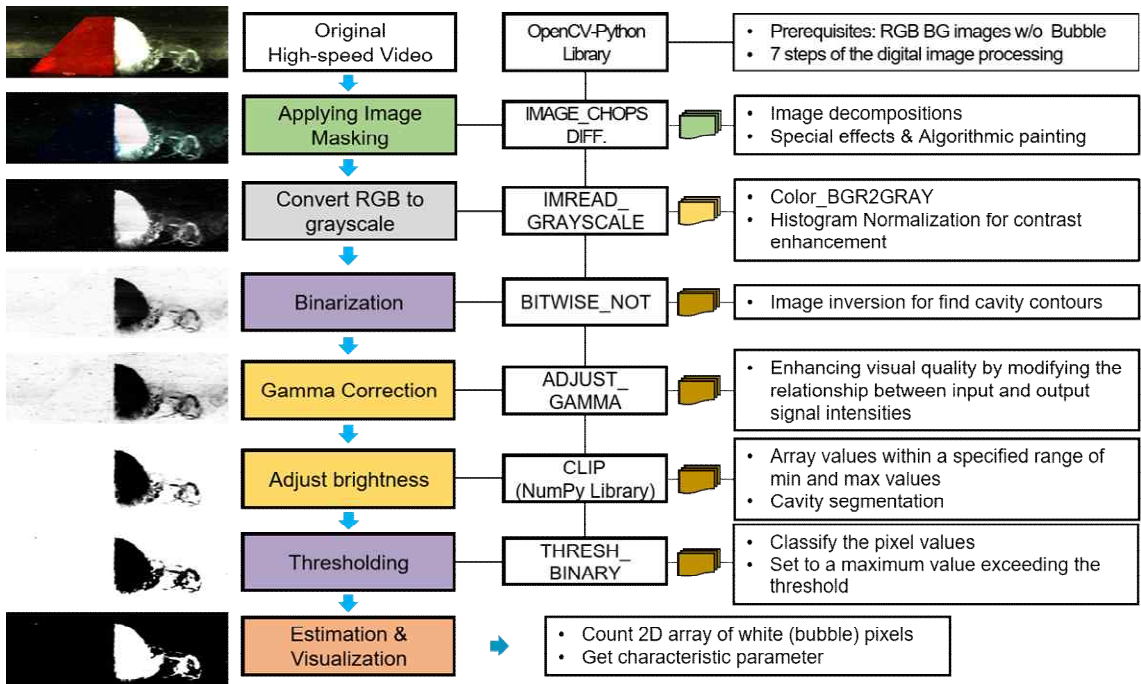


Fig. 11. Image analysis process

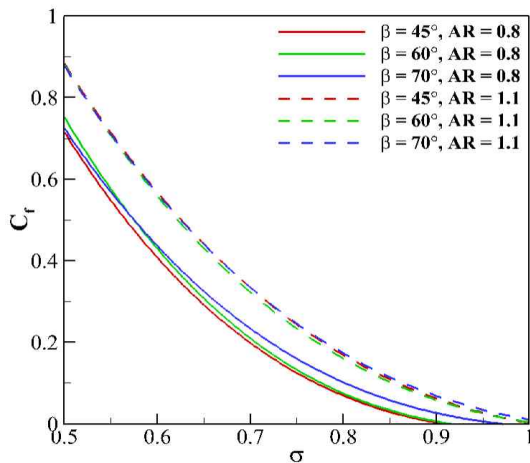


Fig. 12. Cavitation fraction (AoA = 0°)

테이션을 분리해주었고, 여기서 색상 정보를 제거한 뒤에 이를 흑백의 이미지로 변환하였다. 이후 어두운 부분을 강조하기 위하여 이미지의 감마값을 조절하고, 콘트라스트 조절을 통해 캐비테이션과 물의 픽셀값을 대비시켜주었다. 그리고 threshold 값을 주어 캐비테이션의 경계값을 지정해주고, 이를 다시 흑백 반전시킴으로써 캐

비테이션을 백색의 이미지로 나타내었다.(Fig. 11). 각 캐비테이션 수 조건별로 1,000장의 초고속 이미지를 해석하여 식 (3)과 같이 캐비테이션의 발생 비율을 평가하였다.

$$C_f = \frac{A_c}{A_b} \tag{3}$$

여기서  $A_c$ 는 캐비테이션의 면적이고,  $A_b$ 는 모형의 평면면적(Planform area)이다. Fig. 12는 받음각 0도 조건에서 발생하는 후류 보텍스 캐비테이션(WVC)의 정량적 평가 결과로, 캐비테이션 수가 낮아질수록, 즉 속도가 빨라질수록 캐비테이션의 면적은 2차식으로 비례하여 증가하는 특징이 있다. 또한,  $C_f$ 의 값은 중형비가 클수록 커지며, 테이퍼 각도에 따른 차이는 없는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 중형비 1.1인 모형에서 발생하는 앞날 보텍스 캐비테이션(RLVC)의 각도(vortex angle,  $\gamma$ )를 캐비테이션 수에 따라 비교한 결과이며, 캐

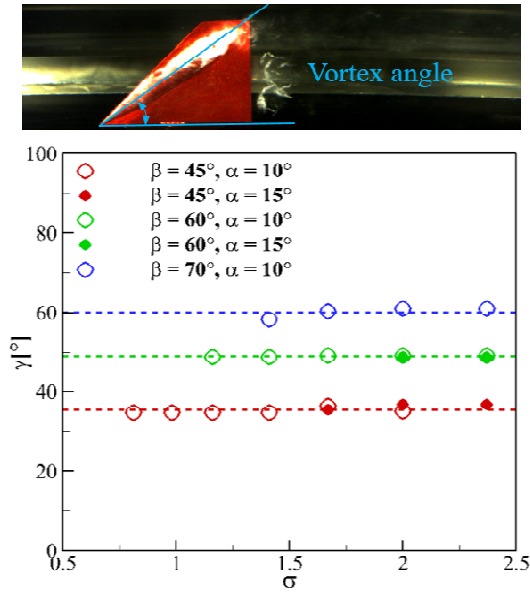


Fig. 13. Vortex angle comparison (AR = 1.1)

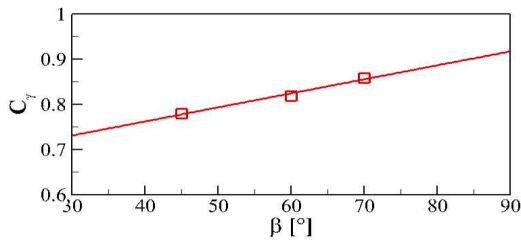


Fig. 14. Vortex angle comparison (AR = 1.1)

비테이션의 상하 경계선을 반분하는 가상선을 기준으로 하였다. 앞날 보텍스 캐비테이션의 각도는 캐비테이션 수나 받음각에 따른 차이 없이 특정한 각도를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 테이퍼 각도가 다른 모형에서도 동일한 경향을 보인다. 또한, 캐비테이션 수가 낮거나, 받음각이 높을수록 RLVC가 시트형 캐비테이션으로 발달하는 시점이 빨라진다는 것을 확인하였다. Fig. 14는 받음각 10도에서 식 (4)와 같이 정의되는 RLVC의 각도( $\gamma$ )를 테이퍼 각도( $\beta$ )로 무차원화한 값으로 테이퍼 각도에 선형적인 관계식을 가지고 있음을 알 수 있다.

$$C_{\gamma} = \frac{\gamma}{\beta} \quad (4)$$

## 4. 결론

본 연구는 선박의 후류 유동 개선과 추진효율 향상을 위해 사용되는 테이퍼 비율을 갖는 보텍스 발생기를 대상으로 캐비테이션 터널 모형실험을 수행하여 발생하는 공동 유동 특성을 분석하였다. 또한, OpenCV를 사용한 이미지 분석을 통해 발생하는 공동을 정량적으로 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 보텍스 발생기에서 발생하는 캐비테이션은 크게 후류 보텍스 캐비테이션, 날개 앞날 보텍스 캐비테이션, 시트형 캐비테이션으로 구분할 수 있으며, 테이퍼 각도, 받음각, 캐비테이션 수 등에 따라 다른 패턴으로 생성된다.
- 후류 보텍스 캐비테이션의 면적의 비율은 캐비테이션 수가 감소할수록 비선형적으로 증가한다. 이때, 테이퍼 각도에 따른 차이는 매우 작고, 종횡비가 증가할수록 비율이 커지는 특징을 가진다.
- 보텍스 발생기 앞날에서 생성되는 보텍스 캐비테이션은 해당 테이퍼 각도에서 압력면으로부터 흡입면으로 넘어가는 보텍스 유동의 강도에 비례하여 특정 각도를 가지고 발달한다.

## 후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00208512)

## REFERENCE

- 1) H. S. Yoon, and H. H. Chun, 2004, "Flow Control and Drag Reduction of a Circular Cylinder by an External Magnetic Field," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41(2), pp. 70~78.
- 2) R. Latorre, 1997, "Ship Hull Drag Rrduction Using Bottom Air Injection," Ocean Engineering, Vol. 24(2), pp. 161~175.
- 3) E. J. Lee, B. G. Hwang, J. J. Kim, and S. J.

- Lee, 2015, “Wind Tunnel Study on Drag Reduction of a 5 Ton Truck Using Additive Devices,” *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 13(1), pp. 9~14.
- 4) U. Fernandez-Gamiz, E. Zulueta, A. Boyano, I. Ansoategui, and I. Uriarte, 2017, “Five Megawatt Wind Turbine Power Output Improvements by Passive Flow Control Devices,” *Energies*, Vol. 10, 742.
- 5) S. H. Lee, and I. W. Lee, 2018, “Verification of Drag Reduction Effect of Outer-layer Vertical Blades based on Model Test,” *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 16(3), pp. 26~34.
- 6) L. Li, B. Zhou, H. Huang, and H. Sun, 2021, “Vortex Generator Design and Numerical Investigation for Wake Non-uniformity and Cavitation Fluctuation Pressure Reduction,” *Ocean Engineering*, Vol. 229, 108965.
- 7) S. W. Jeong, and B. K. Ahn, 2016, “An Experimental Study on Wake Cavity Flow Characteristics of Two-dimensional Wedge Shaped Control Fins”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 53(3), pp. 180~187.

---

<sup>†</sup> Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University  
E-mail: bkahn@cnu.ac.kr

<sup>\*</sup> Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University

---